

УДК 612.3.02,004.896

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СНИЖЕНИЕМ УРАВНИТЕЛЬНЫХ ТОКОВ В ТЯГОВОЙ СЕТИ

¹Костюков А.В., ²Чернов А.В., ¹Маркин А.С.

¹ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения»,
Ростов-на-Дону, e-mail: kav@rgups.ru, granduser.a@mail.ru;

²ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный строительный университет»,
Ростов-на-Дону, e-mail: a.v.chernov@pmvt.ru

Статья посвящена разработке интеллектуальной системы управления снижением уравнильных токов с электрической тяговой сети железных дорог. Особенностью системы управления является возможность работы в автоматическом режиме, а также применение вольтодобавочного трансформатора с изменяемыми режимами функционирования. Автоматический режим функционирования системы обеспечивается интеллектуальным контроллером искусственной вейвлет-нейронной сети. В статье выполнен анализ причин возникновения уравнильных токов в электрической сети тяговых подстанций. Указаны дестабилизирующие факторы, которые сопутствуют уравнильным токам. Выполнена постановка задачи уравнивания токов в тяговой сети железной дороги. Выполнен анализ методов решения задач, связанных со снижением уравнильных токов. Выявлены достоинства и недостатки существующих методов решения поставленной задачи. Предложен оригинальный подход к решению проблемы снижения уравнильных токов и схема интеллектуальной автоматической системы управления. Даны рекомендации по использованию предложенной системы автоматического управления.

Ключевые слова: интеллектуальная система, автоматическая система, уравнильный ток, тяговая сеть, вейвлет-нейронная сеть

INTELLIGENT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR REDUCTION OF EQUALIZING CURRENTS IN TRACTION CURRENT SUPPLY

¹Kostyukov A.V., ²Chernov A.V., ¹Markin A.S.

¹Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: kav@rgups.ru, granduser.a@mail.ru;

²Rostov State University of Civil Engineering, Rostov-on-Don, e-mail: a.v.chernov@pmvt.ru;

Article devoted to develop the intellectual control system for equalizing currents in electrical traction supply of railroads. Feature of the control system is the ability to work in the auto mode, as well as the use of a booster transformer with changeable modes of operation. Automatic mode of the functioning of the system is provided by intelligent controller artificial wavelet neural network. The article analyze of the causes of the equalizing currents in the electrical network traction supply stations. Destabilizing factors that accompany surge are pointed. The problem of equalizing currents reduction in traction railway network has been stated. The analysis of methods devoted to problem solving related to the reduction of equalizing currents has been done. Features and shortcomings of the existing methods has been fulfilled. Article propose the original approach to the solution of the problem in equalizing currents and intelligent and automatic control system schematic diagram. The recommendations on how to use the proposed automatic control system are given.

Keywords: intelligent system, automatic system, equalizing current, traction network supply, wavelet-neural network

В межподстанционной зоне электрических железных дорог уравнильные токи имеются практически всегда. Это связано с тем, что смежные тяговые подстанции питаются от общей энергосистемы, а изменение нагрузки энергосистемы (ЭС) приводит к изменению падений напряжения на тяговых трансформаторах и линиях электропередачи (ЛЭП), что ведет к возникновению неравенства напряжения смежных тяговых подстанций по величине и по фазе и как результат – к появлению уравнильного тока. Положение усугубляется тем, что на тяговых подстанциях с трехфазными трансформаторами ТДТНЖ по схеме (звезда/треугольник) падение напряжения в трансформаторе зависит от тока нагрузки смежного плеча питания. Кроме того, на некоторых дистанциях электроснабжения имеет место несовпадение по величине напря-

жений холостого хода смежных подстанций за счет выбора неверного положения регулятора питающего напряжения (РПН) [4].

Уравнильный ток и сопутствующие ему дестабилизирующие факторы обладают следующими свойствами. Чем больше величина разности напряжений между смежными подстанциями, тем больше значение уравнильного тока. Величина уравнильного тока меняется в широких пределах и может принимать значения от единиц до сотен ампер. При равенстве уровней напряжений по модулю (на смежных тяговых подстанциях) уравнильный ток является активным. Будучи наложенным на ток нагрузки, он увеличивает коэффициент мощности одной из подстанций и снижает на другой.

Уравнильный ток приводит к дополнительным потерям электроэнергии

в тяговой сети, в некоторых случаях потери энергии могут достигать 400–700 тыс. кВтч за год. Наличие уравнительного тока в тяговой сети может привести к перегрузке устройств тягового электроснабжения, перегреву контактной сети, нарушениям в работе релейной защиты, поэтому необходимы организационно-технические мероприятия по устранению или снижению уравнительного тока в тяговой сети.

Для исключения уравнительного тока прибегают к обрыву электрической цепи протекания уравнительного тока. Данный метод является малоэффективным, консольная схема питания межподстанционной зоны должна использоваться с учётом эксплуатационных особенностей данного участка. В противном случае это приведёт к возрастанию потерь от тяговой нагрузки.

Анализ методов определения уравнительных токов

Среди методов и технологий определения уравнительных токов, на наш взгляд, выделяются следующие.

1. Определение уравнительных токов на участке тяговой сети переменного тока при двухстороннем питании, основанный на измерении питающих напряжений как по модулю, так и по фазе. Знание этих величин при известных электрических параметрах тяговой сети позволяет определить уравнительный ток. Однако задача усложняется значительным расстоянием между тяговыми подстанциями и отсутствием возможности измерения разности фаз напряжений подстанций, питающих данную фидерную зону.

Это вызывает необходимость одновременного замера напряжения. По осциллограммам определяют действующие значения напряжений и их фазовые сдвиги. По найденным величинам вычисляют кратную величину уравнительного тока в данный момент времени [2].

2. Способ определения уравнительного тока, требующий предварительного определения гармоничного состава тягового тока и напряжения тяговой подстанции в двух режимах: при двухстороннем питании и отключенной второй тяговой подстанции (Авторское свидетельство СССР № 1643228 А1, 1991, В 60 М 3/02).

В данном способе уравнительный ток определяют по аналитическому выражению, содержащему действующие значения высших гармонических составляющих тягового тока при двухстороннем питании и при отключенной второй подстанции, а также значениях сдвига фаз между первыми гармониками тока и напряжения в обоих режимах. Выражение получено при условии равенства коэффициентов гармоник тягового тока на шинах первой

подстанции при двухстороннем и консольном питании. Способ упрощает определение уравнительного тока за счет измерений лишь на одной из тяговых подстанций.

Недостатки данного метода сводятся к нарушению режима работы тяговой сети, необходимость переключения с двухстороннего на одностороннее питание.

3. Способ определения уравнительного тока двухпутного участка тяговой сети переменного тока состоит в регистрации изменения токов в определённые временные интервалы, по отношениям сопротивлений и соответствующих им токов тяговой сети нечетного и четного путей между шинами подстанций. Фиксируются интервалы времени, в течение которых отношение токов обратно пропорционально отношению их сопротивлений, полученные интервалы используют для формирования суммарного интервала времени отсутствия тяговой нагрузки в течение установленного времени и значения указанных токов и сформированный интервал времени используют для определения среднего квадратического значения уравнительного тока (Патент РФ № 2128120, 1999, В60М3/02).

4. Способ определения уравнительных токов, основанный на определении разницы показаний счетчиков смежных подстанций, а также по средневзвешенным коэффициентам мощности.

5. Способ определения уравнительного тока по коэффициенту третьей гармоники, тока суммарного времени протекания уравнительного тока в межподстанционной зоне. По мгновенным значениями тока и напряжения первой тяговой подстанции определяют активную и реактивную энергию в течение суммарного времени протекания уравнительного тока в межподстанционной зоне за периоды отсутствия тяговой нагрузки в течение установленного интервала времени определения уравнительного тока. Значения энергии могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. Суммарное время T протекания уравнительного тока в межподстанционной зоне зависит от размеров движения поездов на исследуемом участке. При низких размерах движения T соизмеримо с установленным интервалом времени определения уравнительного тока. При высоких размерах движения значение T состоит из интервалов времени отсутствия поездов на участке, предусмотренных на выполнение ремонтных работ. Уравнительный ток в отличие от тягового является практически синусоидальным, коэффициент третьей гармоники тока служит информативным параметром об отсутствии в межподстанционной зоне тягового и наличии лишь уравнительного тока (Патент РФ № 2116206, 1999, В60М3/00).

Таблица 1

Измеряемые параметры и сопутствующие факторы уравнильного тока

| № п/п | Измеряемые параметры | Сопутствующие действия (факторы) |
|-------|---|---|
| 1 | Фидерные токи | При отсутствии нагрузки |
| 2 | Напряжения холостого хода | Точность измерений (разница напряжений может отличаться на 5–10 %, фазовый угол 3–5 %) |
| 3 | Измерение напряжений, угла сдвига фаз | Одновременное измерение на смежных фидерах контактной сети |
| | Определение соотношений токов и сопротивлений тяговой сети | Фиксируют интервалы времени, в течение которых отношение токов путей обратно пропорционально отношению их сопротивлений |
| 4 | Определение гармонического состава тягового тока и напряжения | Измерения производят при двухстороннем питании, затем при одностороннем |
| 5 | Определение коэффициента третьей гармоники суммарного тока | Необходимо отсутствие тяговой нагрузки в определенный интервал времени |
| 6 | Определение расхода энергии, средне-взвешенных коэффициентов мощности | Раздельно по плечам питания на смежных подстанциях |

Все рассмотренные способы позволяют определить основные параметры, по которым можно определить величину уравнильного тока. Для удобства классификации параметры представлены в табл. 1.

Схема интеллектуальной автоматической системы снижения уравнильных токов

Задача снижения потерь от уравнильного тока является комплексной задачей, включающей в себя рассмотрение вопросов измерения и снижения уравнильных токов с использованием различных организационно-технических мероприятий.

Предлагается решить задачу по снижению уравнильных токов с помощью интеллектуальной системы автоматического снижения уравнильных токов, схема которой представлена на рис. 1. Центральными подсистемами являются: вольтодобавочный трансформатор и автоматическая система управления на базе контроллера искусственной вейвлет-нейронной сети.

Схема подключения вольтодобавочного трансформатора (ВДТ) показана на рис. 2. Вторичная обмотка ВДТ включается в цепь отсоса тяговой подстанции, а первичная обмотка подключается к тяговой обмотке силового трансформатора. При этом возможны три варианта подключения к фазам АВ, ВС или СА с прямой либо обратной полярностью (ВА, СВ, АС). (Патент РФ № 2137623, 1999).

Рассмотрим работу устройства автоматического снижения уравнильных токов. Данные с измерительных трансформато-

ров напряжения и тока, а также приборов учёта электроэнергии поступают на блок формирования измеряемых параметров электроэнергии, который представляет собой аналогово-цифровой преобразователь и нормализатор исходных данных. Блок установки постоянных параметров электроэнергии передаёт информацию о характеристиках тяговой сети, схемах соединения, режимах работы трансформатора, величины напряжения. Данные из указанных блоков являются входными величинами контроллера искусственной вейвлет-нейронной сети (КИВНС).

КИВНС представляет собой нейропроцессор, реализующий алгоритмы вейвлет-преобразований [1] и алгоритмы искусственных нейронных сетей [3] аппаратным образом. Вейвлет-нейронная реализация алгоритмов [5] позволяет учесть существенные особенности решаемых задач с помощью подбора базисов и ядер вейвлет-преобразований. Схема КИВНС показана на рис. 3. Назначением КИВНС является автоматическая выработка решения изменения уравнильного тока в зависимости от нагрузки, способная заменить специалиста-эксперта и принять правильное решение по выбору позиции РПН.

После выработки решений КИВНС подается команда на быстродействующий переключатель режимов ВДТ. Быстродействующий переключатель со встроенным алгоритмом принимает команду о необходимости выбора позиции РПН с учетом значений уставок выбранного режима работы и состояния управляющих сигналов от КИВНС.

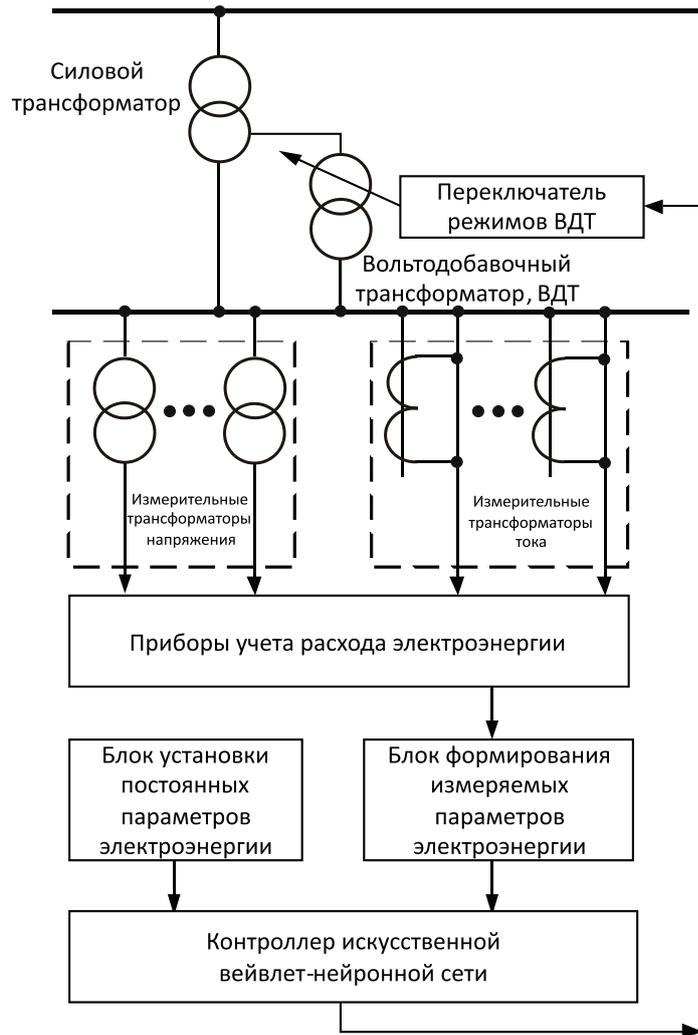


Рис. 1. Интеллектуальная система автоматического снижения уравнильных токов

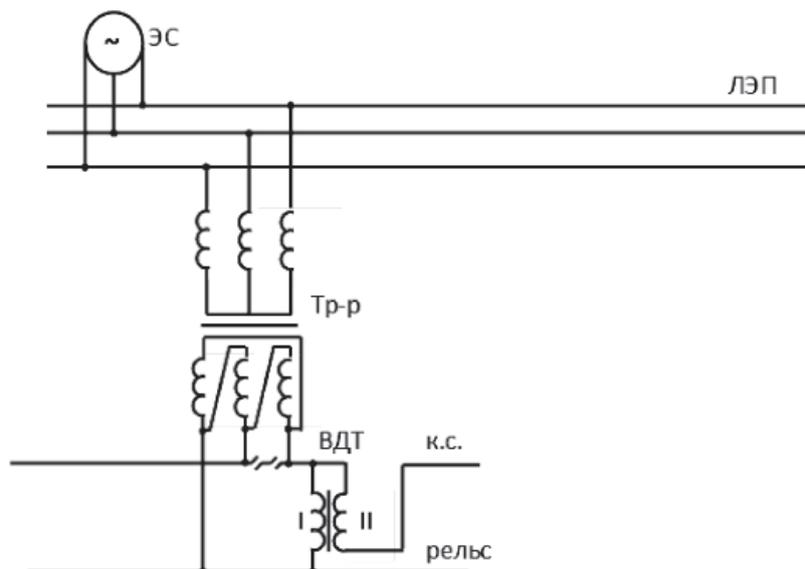


Рис. 2. Схема подключения вольтодобавочного трансформатора

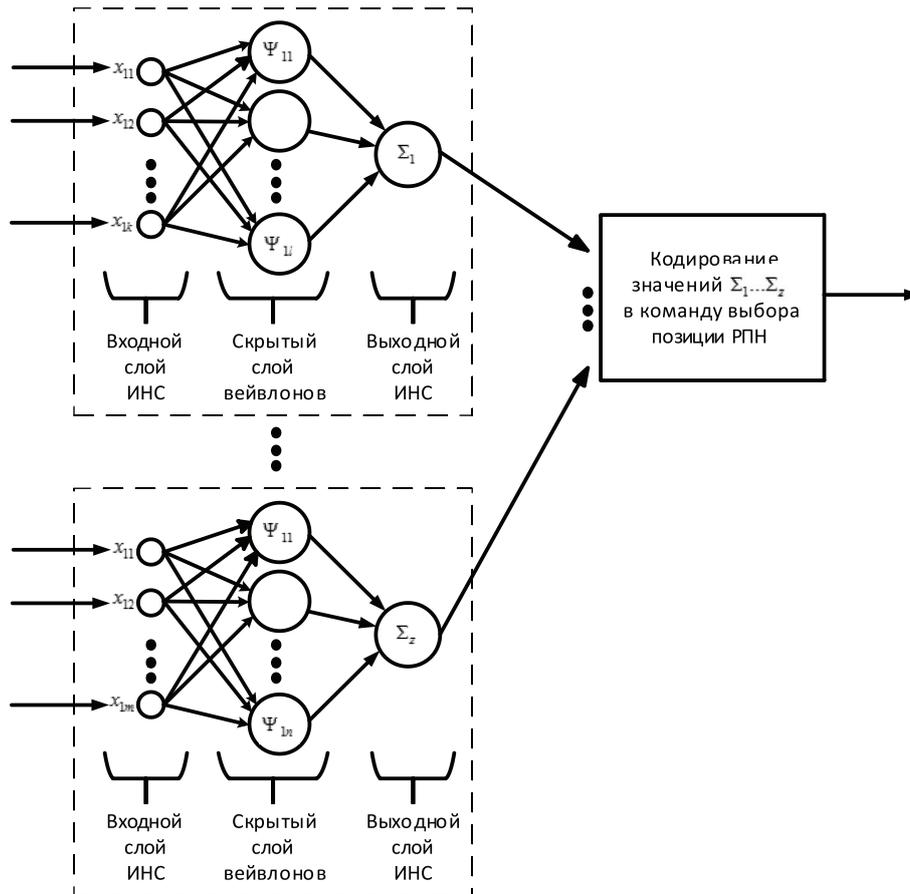
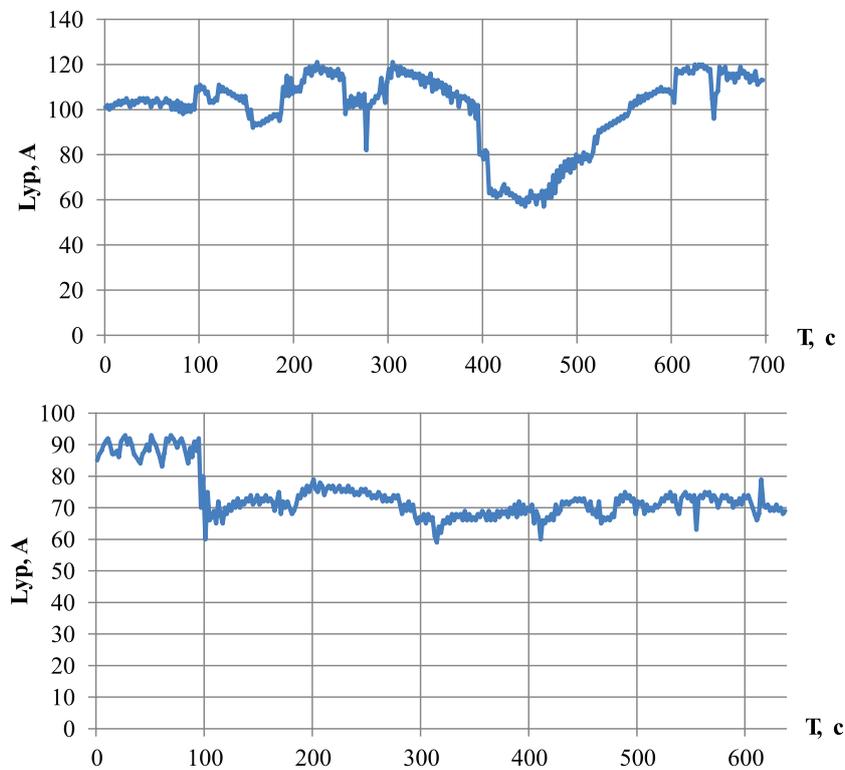


Рис. 3. Схема KIBHC

Рис. 4. Изменение величины уравнительного тока за время T

Результаты моделирования и экспериментов

Авторами была проведена серия экспериментов по подбору ядра вейвлет-преобразования, в числе которых были апробированы вейвлеты: Хаара, Добеши, Гаусса, Шеннона, Морле, Мейера, симлеты, биортогонального типа и типа «мексиканская шляпа». При обработке в КИВНС данных тягового тока наиболее подходящим оказался вейвлет Добеши с компактным носителем. Получена зависимость уравнивающего тока для переходных режимов нагрузки силового трансформатора тяговой подстанции, показанная на рис. 4.

Полученная зависимость уравнивающего тока совпала с результатами расчётов при математическом моделировании участка контактной сети, с учётом всех параметрических характеристик тяговой сети и системы электроснабжения.

Выводы и рекомендации

Таким образом, расчёты и экспериментальные исследования показали, что устройство автоматического снижения уравнивающих токов позволяет в автоматическом режиме выбрать необходимую позицию РПН вольтодобавочного трансформатора с учётом величины уравнивающего тока и тем самым снизить величину уравнивающего тока фидерной зоны не менее чем в 4–5 раз. Данное устройство также позволяет ограничить величину ударного тока короткого замыкания, при этом механические усилия, действующие на обмотки силового трансформатора, уменьшаются примерно в 4 раза. В качестве ВДТ можно использовать трансформаторы типа ОЦР-5600/25, демонтированные с электровагонов ВЛ-60К, что позволяет снизить затраты на приобретение основного оборудования данного устройства.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты 13-01-00325-а, 13-08-12151-офи_м.

Список литературы

1. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2001. – 464 с.
2. Межвузовский сборник научных трудов // Хабаровский институт инженеров железнодорожного транспорта. – Хабаровск, 1986. – С. 11–14.
3. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
4. Черемисин В.Т., Квашук В.А. Контроль уравнивающих токов, методика оценки потерь в тяговой сети переменного тока и мероприятия по их снижению // Сборник трудов Второго Международного Симпозиума ЭНСБ-КЭ-ЭМС-ЭМЭ-2000. – М.: МИИТ, 2000.
5. Alexandridis A.K., Zapranis A.D. Wavelet Neural Networks: With Applications in Financial Engineering, Chaos, and Classification. Wiley. – 2014. – 264 p.

References

1. Dobeshi I. Desjat' lekcij po vejvletam. Izhevsk: NIC «Reguljarnaja i haoticheskaja dinamika». 2001. 464 p.
2. Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov // Habarovskij institut inzhenerov zheleznodorozhnogo transporta. Habarovsk. 1986. pp. 11–14.
3. Hajkin, S. Nejrornyjeseti: polnyjkurs, 2-e izdanie. Per. s angl. M.: Izdatel'skijdom «Vil'jams». 2006. 1104 p.
4. Cheremisin V.T., Kvashhuk V.A. Kontrol' uravnitel'nyh tokov, metodika ocenki poter' v tjavogoj seti peremennogo toka i meroprijatija po ih snizheniju // Sbornik trudov Vtorogo Mezhdunarodnogo Simpoziuma JeNSB-KJe-JeMS-JeMJe-2000. M.: MIT, 2000.
5. Alexandridis A.K., Zapranis A.D. Wavelet Neural Networks: With Applications in Financial Engineering, Chaos, and Classification. Wiley. 2014. 264 p.

Рецензенты:

Петрушин А.Д., д.т.н., заведующий кафедрой «Электрический подвижной состав», ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону;

Долгий И.Д., д.т.н., заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте», ФГБОУ ВПО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на-Дону.

Работа поступила в редакцию 09.02.2015.